

Транспортное средство на магнитном подвесе

Е. Ю. Клименко д-р ф.-м. наук, профессор

В. И. Омеляненко д-р техн. наук, профессор

Приводятся проекты магнитолевитирующих поездов, используемых в коммерческих перевозках. Предложена концепция такого поезда с оригинальными тяговолеватационной системой и сверхпроводящим магнитом.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие научные и опытно-конструкторские разработки в области магнитолевитирующего транспорта медленно, но уверенно переходят в стадию внедрения такого рода поездов в коммерческие пассажирские перевозки. Однако, научные исследования в этой области принципиально нового вида транспорта мировым научно-техническим сообществом все более расширяются. Об этом свидетельствуют материалы 23 конференции MAGLEV 2016, недавно прошедшей в Берлине.

В предлагаемой читателям статье авторы, описывая существующие и реализуемые в Китае, Южной Корее и Японии коммерческие проекты магнитолевити-

рующего транспорта, предлагают свое видение концепции транспортной системы с электродинамическим подвесом, которая может быть полезной при формировании исходных данных технического задания на создание магнитолевитирующих поездов для наших климатических условий. Эта работа рассматривается нами как создание определенного научного задела по весьма перспективному направлению в области высокоскоростного железнодорожного транспорта.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА НА МАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ

Исследования в области транспорта на магнитной подушке или так называемого магнитолеви-

тирующего транспорта научно-техническое сообщество наиболее развитых стран ведет уже более 50 лет. Из множества разновидностей систем подвеса и бокового направления такого транспорта выкристаллизовались системы электромагнитного подвеса (ЭМП) и электродинамического подвеса (ЭДП).

Для ЭМП используются притяжение нормально проводящих магнитов на поезде к ферромагнитному путевому полотну. Зазор между поездом и путевой структурой составляет не более 8...10 мм. Поскольку ЭМП принципиально неустойчива, в процессе движения требуется сложная система регулирования зазора.

ЭДП основана на отталкивании сверхпроводящих магнитов поезда



Рис.1. Пригородный поезд HSST (Япония)



Рис. 2. Пригородный поезд «Инчхон – Сеул» (Южная Корея)



Рис. 3. Коммерческий поезд Пудонг – Шанхай (Китай)



Рис. 4. Коммерческий межрегиональный поезд LO (Япония)

от немагнитной путевой структуры. Эта система принципиально устойчива. Зазор между поездом и путевой структурой может достигать до 150 мм. Проблема – создание мощных, компактных и прочных сверхпроводящих магнитных систем (СМС).

В качестве движителей для транспорта с ЭМП используются линейные асинхронные двигатели (ЛАД), а также линейные синхронные двигатели (ЛСД). Для транспорта с ЭДП применяются только ЛСД [1].

Высокоскоростной магнитолевитирующий транспорт достиг на сегодня уровня начала практической реализации.

Так, весной 2005 года в северо-восточном пригороде Нагоя введена в эксплуатацию двухпутная линия Tobu Kyuuryo Line “Linimo”, длиной 9,2 км, по которой с помощью ЭМП и ЛАД перемещается со скоростью 100 км/час 3-х вагонный поезд HSST (рис. 1). Два концевых вагона имеют длину 14 м, промежуточный – 13 м. Общее количество пассажиров, включая стоящих, – 248. Вес одного вагона с пассажирами 28 т. Подвес каждого вагона с зазором 6...8 мм обеспечивается пятью парами электромагнитов. Питание этих электромагнитов, а также первичной обмотки ЛАД обеспечивается постоянным напряжением 1500 В через контактные рельсы, расположенные с двух сторон путевой полотна. Стоимость проекта составила \$ 280 млн.

Подобного рода проект в феврале 2016 года создан в Южной Корее. Здесь между аэропортом Инчхон и станцией метрополитена в Сеуле Йонгу открыта двухпутная линия Incheon Airport Maglev длиной 6,1 км, имеющая 6 станций. Двух вагонный поезд (рис. 2) имеет максимальную скорость 110 км/час. Каждый вагон длиной 12 м, шириной 2,7 м, высотой 3,45 м, с массой тары 19 т, вмещает 115 пассажиров. Тягово-левитационная система размещается на 4-х тележках каждого вагона. Ее

схема и параметры аналогичны HSST. Стоимость проекта составляет \$ 342 млн.

Описанные выше магнитолевитирующие системы с ЭМП носят скорее демонстрационный характер. Впервые такая система введена в коммерческую эксплуатацию в Китае 29 декабря 2003 года. Она является продуктом немецкой системы Transrapid. Двухпутный участок длиной 30 км соединяет аэропорт Пудунг с центром Шанхая. Три 5-вагонных поезда (рис. 3) движутся в обе стороны с интервалом 10 мин в течении 18 ч в сутки. Время в пути 7,5 мин, максимальная эксплуатационная скорость 430 км/ч. Стоимость проекта \$ 1,7 млрд.

Самым амбициозным проектом в области магнитолевитирующего транспорта как по масштабам, так и по техническому новшеству является линия Thuo Shinkansen, которая строится между Токио Осакой и планируется ко вводу в 2045 году. Первая очередь этой линии между Токио и Нагоя должна быть завершена в 2027 году. Из 285,6 км этой трассы 256,6 км будут пролегать в тоннелях, 23,6 км – на виадуках и 11,3 км – на мостах. Стоимость, по предварительной оценке, колеблется в пределах \$ 46,5...49,8 млрд. Любопытно отметить, что фактическая стоимость таких приблизительно аналогичных по масштабам проектов как тоннель под Ла-Маншем, а также первой в мире высокоскоростной железнодорожной линии Токайдо превышала проектную в 2 раза.

Начало строительства относится к 1989 году, когда Министерство транспорта Японии приняло решение построить в районе г. Кофу префектуры Яманаши полигон для испытаний магнитолевитирующего транспорта, который бы в случае положительного результата мог бы быть преобразован в часть коммерческой магистрали [2]. В 1997 году был введен в эксплуатацию первый участок длиной 18,4 км с кривой радиусом

8000 м и максимальным уклоном 40 ‰. На нем велись испытательные поездки 3-х и 4-х вагонных поездов MLX01. Поезда состояли из вагонов, опирающихся своими концами на сочленяющие тележки, на которых с каждой стороны размещались СМС с 4-мя сверхпроводящими магнитами в каждой.

В настоящее время длина участка составляет 42,8 км. На нем с 2011 года осуществляются поездки 7-ми вагонных поездов серии LO (рис. 4), которые имеют головные вагоны длиной 28 м (15 м – носовая часть), где располагаются 24 пассажира, а также средние – длиной 24,3 м (68 пассажиров). Масса этих вагонов с пассажирами составляет 32 т – головного и 22 т – среднего. На поезде LO в апреле 2015 года была установлена рекордная скорость 603 км/час. Ожидается, что при средней скорости 505 км/час время поездки между Токио и Нагоя может составить 40 мин, а между Токио и Осакой – 1 ч 07 мин.

Примеры реализации описанных выше проектов свидетельствуют о том, что на пути внедрения магнитных поездов в коммерческую эксплуатацию нет никаких серьезных технических препятствий. Существенным препятствием является экономические, или даже скорее – политические соображения, обусловленные попытками предугадать будущие проблемы, чтобы не оказаться в плену слишком дорогой программы.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Авторы этой статьи отдают предпочтение магнитному транспорту с электродинамической левитацией. Привлекательным является существенно больший зазор между поездом и путевой структурой, а также принципиальная устойчивость данного типа подвеса, не требующая сложной системы управления. Технологии, связанные с созданием транспортных СМС, освоены нами в 80-х годах прошлого столетия при создании полномасштабных магнитов

из низкотемпературных сверхпроводников NbTi и Nb₃Sn [3,4,5]. Более того, успехи в области создания высокотемпературных проводников (ВТСП), позволяющих перейти от гелиевых критических температур к азотным, открывают перспективы существенного упрощения конструкции транспортных криостатов. Для нас это обстоятельство является еще одним аргументом в вопросе выбора типа подвеса при разработке концепции магнитолевитирующего транспорта.

Устройство транспортной системы

Устройство представляет собой совокупность направляющего путевого полотна и транспортного средства (рис. 5).

По конфигурации путевого полотна различают плоскую путевую структуру, желебообразную, выполненную либо в виде 120° сегмента, либо в форме перевернутой буквы «П», а также с центральной вертикальной направляющей, выполненной либо в виде перевернутой буквы «Т», либо в виде П-образного короба.

Исходя из климатических условий Восточной Европы, по нашему мнению, целесообразно принять схему конструкции транспортной системы на электродинамическом подвесе с путевым полотном в виде центрального П-образного направляющего короба, зафиксированного на горизонтальной фундаментной плите. На вертикальных боковых сторонах короба, а также на прилегающих к ним частям фундаментной плиты, закреплены путевые катушки тяги, подвеса и направления.

Транспортное средство включает платформу и транспортируемый модуль – либо вагон для пассажиров, либо грузовой контейнер

Платформа, охватывающая направляющий короб, представляет собой раму, на боковых сторонах которой размещаются сверхпроводящие магнитные системы (СМС) и структуры криогенного блока,

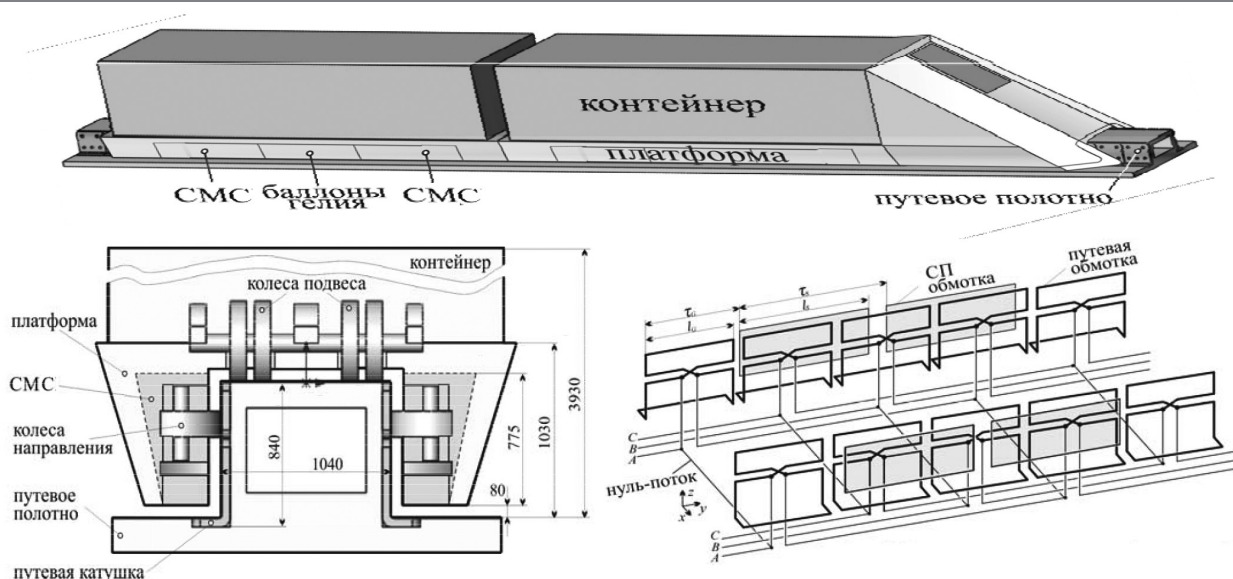


Рис. 5. Концепция предлагаемой транспортной системы

а на обоих концах по длине размещаются колесные блоки, обеспечивающие подвес и направление платформы при скоростях движения менее 100 км/ч. Предусмотрена возможность соединения нескольких платформ в поезд.

Объединенная тягово-левитационная система (PLG) использует для тяги, подвеса и бокового направления взаимодействие токов вертикальных сверхпроводящих магнитов платформы и асимметричных 8-образных катушек нулевого потока пути. Отгиб нижней части путевых катушек в сторону сверхпроводящих магнитов, повышает левитационное качество благодаря эффективному использованию для подвеса тока обмотки якоря линейного синхронного двигателя.

Сверхпроводящая магнитная система

Сверхпроводящие магнитные системы (СМС), представляющие собой совокупность сверхпроводящего магнита и криостата, являются главным узлом магнитного транспорта с электродинамической левитацией. Свидетельствует этому служит тот факт, что прогресс в области создания транспортных средств на электродинамическом подвесе неразрывно

связан с совершенствованием конструкции СМС.

Процесс создания сверхпроводящих магнитных систем для магнитного транспорта с электродинамической левитацией представляет собой сложную и многоплановую научно-техническую задачу. Приведенная на рис. 6 схема этого процесса включает три следующих основных направления:

- выбор и анализ сверхпроводящего провода;
- разработку конструкции и технологии изготовления сверхпроводящего магнита;
- разработку конструкции и создание криостата.

Сверхпроводящий магнит (СМ) является центральным звеном СМС. Его конструкция, геометрические и электромагнитные параметры должны быть такими, чтобы обеспечивать в рассматриваемых устройствах электромагнитное преобразование энергии с требуемыми эффективностью и качеством при надлежащем уровне надежности, исключая неуправляемый переход магнита в нормальное состояние. Прежде всего, магнит должен создавать в активной зоне систем тяги, подвеса и бокового направления магнитное поле надлежащей формы и интенсивности для обе-

спечения требуемого уровня и зависимости от скорости сил тяги, подвеса и бокового направления.

Сверхпроводящий магнит содержит основной элемент – выполненную из сверхпроводящего провода обмотку (катушку) – и различные вспомогательные системы, предназначенные для обеспечения условий функционирования обмотки. К вспомогательным относятся система компенсации электродинамических усилий (бандаж), система охлаждения и защиты.

Криостат предназначен для предотвращения поступления тепла извне к сверхпроводящему магниту, обеспечивая необходимые температурные условия сверхпроводнику катушки и тем самым устойчивую и надежную работу источника магнитного поля тягово-левитационной системы.

Транспортный криостат должен обладать повышенной механической прочностью конструктивных элементов, передающих значительные механические усилия от сверхпроводящей обмотки к вагону транспортного средства в условиях тряски и вибраций с величиной динамического ускорения порядка 5g. Он должен иметь минимальный вес, быть компактным, иметь минимально возможное расстояние между

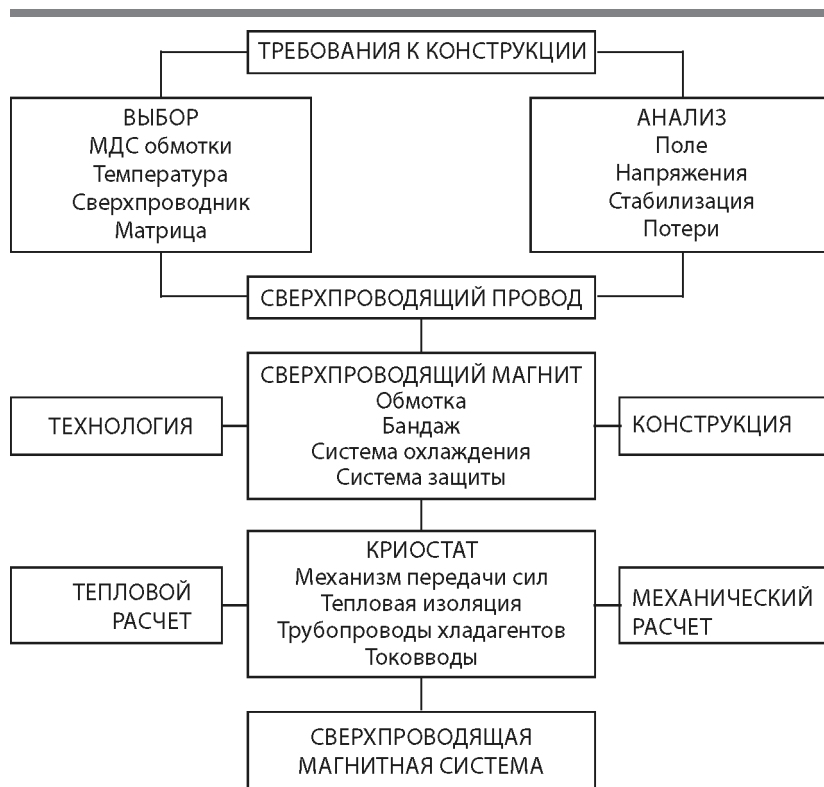


Рис. 6. Процесс создания сверхпроводящих магнитных систем для транспорта

своими наружными поверхностями, обращенными в активную зону, и сверхпроводящими магнитами.

Предлагаемая нами конструкция СМС представлена на рис. 7.

Здесь в каждой паре двухгазетных сверхпроводящих обмоток магнитные поля направлены встречно. Обмотки приклеены к внешней стороне сосуда с жидким гелием. Толщина стенки 1 мм. Емкость с жидким гелием заполнена сотовой стеклотекстолитовой структурой с вертикальными каналами, ограничивающей развитие длинноволновых колебаний поверхности хладагента при ускорениях платформы. Будучи приклеено к внутренней стороне оболочки емкости, это заполнение обеспечивает устойчивость плоских стенок емкости по отношению к внутреннему давлению. Хладоводы «растягивают» гелиевую температуру на внешнюю поверхность СП обмотки. Они приклеены к наружной поверхности СП обмотки. Толщина 1 мм.

Охлаждаемый испарившимся гелием промежуточный медный экран, имея температуру 60К, снижает теплоприток к обмотке и устраняет электромагнитные

возмущения, для чего на его поверхности размещена структура из пересекающихся ВТСП лент второго поколения шириной 4 мм и толщиной 0.4 мм. Временная постоянная такой структуры определяется контактным сопротивлением между лентами и значительно превышает постоянную времени меди. Это позволяет полностью исключить влияние переменных электромагнитных полей на СП обмотку.

Между экраном и внешней оболочкой помещен слой суперизоляции толщиной 40-60 мм (слои металлизированного лавсана, проложенные нейлоновой сеткой).

Усилие от сверхпроводящих обмоток передается на внешнюю оболочку криостата системой прочных равнонапряженных стеклотекстолитовых подвесов. Они состоят из стеклотекстолитовой ленты шириной 10 мм и толщиной 1 мм, наматываемая на пару втулок из нержавеющей стали, которые закрепляются за утолщенные фланцы торцов всех оболочек с разной температурой. При длине растяжки 0,21 м, она выдерживает нагрузку 200 кН при теплопритоке

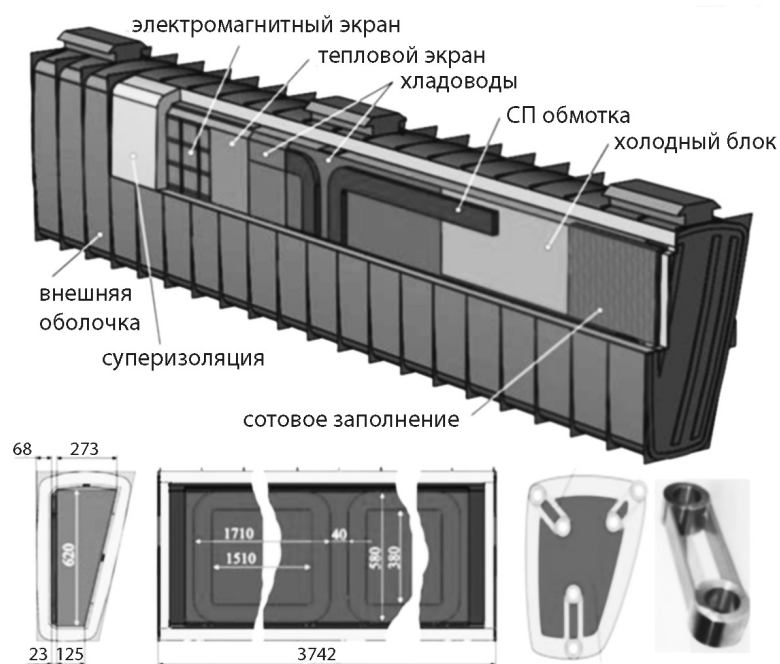


Рис. 7. Конструкция предлагаемой СМС и ее элементы

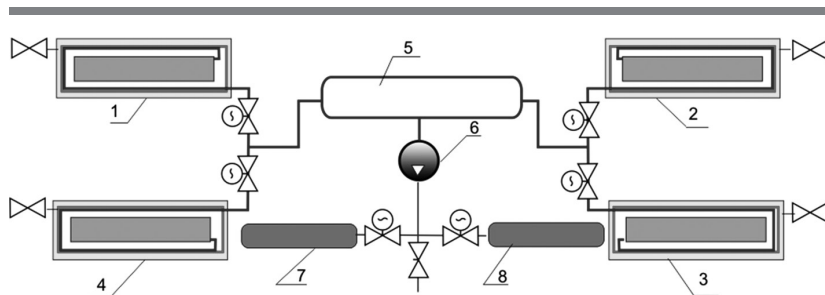


Рис. 8. Предлагаемая схема системы криообеспечения:
1-4 – СМС, 5 – балластная емкость или резиновый газгольдер
в металлической оболочке, 6 – компрессор, 7, 8 – баллоны высокого
давления

0,1 Вт между поверхностями с температурами 60 и 4 К.

Устойчивость наружного слабовыпуклого кожуха против внешнего давления обеспечивается обрешеткой.

Использование съемных, или размыкаемых тоководов в комбинации с тепловым ключом из NbTi в мельхиоровой матрице из 10 проволок диаметром 0.85 мм, длиной 40 м, сопротивлением 1 Ом и сопротивлением контактов 10^{-11} Ом обеспечивает работу сверхпроводящего магнита в режиме замороженного тока с постоянной разрядки 4×10^9 с (сто с лишним лет).

Для системы криообеспечения СМС более предпочтительным по сравнению с использованием бортовых рефрижераторов нам представляется вариант с запасом жидкого гелия, пополняемый на конечных станциях от стационарных ожижителей. Схема этой системы приведена на рис. 8.

Испарившийся гелий закачивается в баллоны высокого давления, расположенные в боковых карманах платформы на одном уровне с криостатами. Запас жидкого гелия в сосуде может пополняться на конечных станциях один раз за 72 часа эксплуатации.

Параметры и характеристики предлагаемой транспортной системы

Параметры и характеристики концептуального проекта предлагаемой транспортной системы приведены таблице.

Полученные в итоге разработки концепции геометрические и электрофизические параметры могут быть использованы как исходные данные технического

задания на НИР и ОКР по созданию магнитолевитирующего транспорта с электродинамическим подвесом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическая реализация транспорта на магнитном подвесе на сегодняшний день стала возможной благодаря современному состоянию таких высоких технологий, как преобразовательная и микропроцессорная техника, являющихся узловыми в системе ЭМП, а также технической сверхпроводимости, без которой невозможно реализовать ЭДП.

Предложена оригинальная конструкция СМС, в которой емкость с жидким гелием заполнена бло-

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ

| | | |
|---|--|-----------------------|
| ПЛАТФОРМА (включая контейнер) | | |
| Размер (длина×ширина×высота) | м | 14×2,6×3,9 |
| Масса | т | 40 |
| Размещение сверхпроводящих обмоток | 4 полюса в 2 ряда на платформу, справа и слева – разноименные полюса | |
| ПУТЕВАЯ КАТУШКА | | |
| Размер* (длина×шаг) | м | 1,0×1,17 |
| Высота* (нижняя, верхняя, отгиб) | м | 0,37; 0,23; 0,15 |
| Материал | | Алюминий |
| Расход материала | м³/м | 0,018 |
| Индуктивность | мГн | 1,41 |
| Активное сопротивление | мОм | 26,4 |
| Число витков | | 24 |
| СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ОБМОТКА | | |
| Размер одной обмотки (длина×ширина×толщина) | м | 1,61×0,48×0,0228 |
| Сверхпроводящий провод | | 23×СКНТ 0.85-2916-0.4 |
| Длина провода в паре обмоток | м | 800 |
| МДС | кА | 700 |
| Индуктивность | мГн | 42,24 |
| Запасенная энергия | МДж | 1,044 |
| Рабочий ток | кА | 7,0 |
| Максимальное поле | Тл | 6,41 |
| Масса обмотки | кг | 155 |

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ

| | | |
|----------------------------------|-----|--|
| Скорость | м/с | 111 |
| Эффективный зазор | м | 0,08 |
| Сила (подвес; тяга; направление) | кН | 403; 187; 120 (при смещении 0.03 м) |
| Полюсное деление ЛСД | м | 1,750 |
| Ток якоря | А | 1000 |

* по средней витку

ком из сотового текстолита. Это, на первый взгляд, простое решение помимо обеспечения высокой жесткости, компактности, легкости и надежности СМС, позволяет исключить из системы криообеспечения рефрижератор и, тем самым, обеспечив ее простоту, повысить надежность.

Стоимость одного километра транспортной системы на магнитном подвесе колеблется в пределах \$ 30 ... 175 млн. Столь дорогостоящее предприятие под силу стране с высокоразвитой экономикой при условии наличия политической воли руководства

государства начать и завершить этот проект.

Однако, в любой ситуации работы, направленные на создание определенного научного задела по весьма перспективному направлению в области высокоскоростного железнодорожного транспорта, считаем актуальными.

ЛИТЕРАТУРА

Локомотив

1. Омеляненко В. И. *Высокоскоростной электрический транспорт. Магнито-левитирующие поезда.* // Локомотив-інформ: — 2006. — № 6. — С. 13-17.
2. *Высокоскоростной магнитный транс-*

порт с электродинамической левитацией / Дзензерский В. А., Омеляненко В. И., Васильев С. В. и др. — К: Наукова думка. — 2001. — 479 с.

3. Klimenko E. Yu., Novikov S. I., Omelyanenko V. I. et al. *Superconducting magnet for high speed ground transportation* // *Cryogenics*. — 1990. — 30, №1. — P. 41-45.
4. Klimenko E., Mokhnatuk V., Omelyanenko V. et al. *Adhesive Bounded SC Windings* // *Applied Superconductivity Conference: Boston*. — 21.04.1994. — P. 100.
5. Klimenko E. Yu., Omelyanenko V. I., Sergeev S. A. et al. *Superconducting Magnets for Transport* // *IEEE Trans. on Magnetics*. — 1992. — 28, №1. — P. 470-473.